

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2005 年 9 月 15 日 (15.09.2005)

PCT

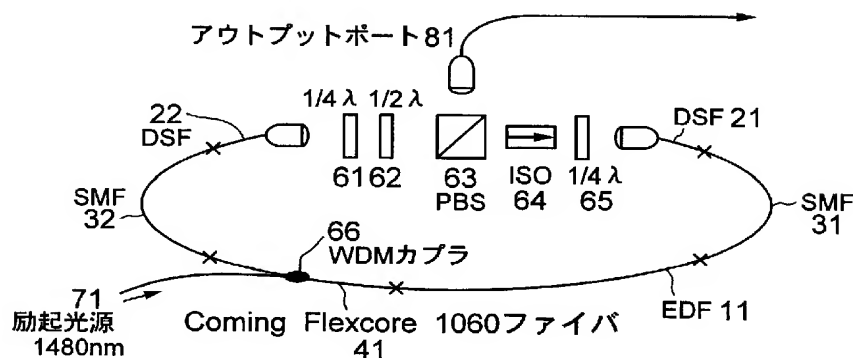
(10) 国際公開番号
WO 2005/086299 A1

- (51) 国際特許分類: H01S 3/06, 3/098 (72) 発明者; および
(21) 国際出願番号: PCT/JP2005/003785 (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 相曽 景一 (AISO, Keiichi) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP). 忠隈 昌輝 (TADAKUMA, Masateru) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP).
(22) 国際出願日: 2005 年 3 月 4 日 (04.03.2005)
(25) 国際出願の言語: 日本語
(26) 国際公開の言語: 日本語
(30) 優先権データ: 特願2004-062728 2004 年 3 月 5 日 (05.03.2004) JP (74) 代理人: 川和 高穂 (KAWAWA, Takaho); 〒1080073 東京都港区三田三丁目 1-1 O 三田マルハチビルディング 7 階 Tokyo (JP).
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 古河電気工業株式会社 (THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1008322 東京都千代田区丸の内 2 丁目 6 番 1 号 Tokyo (JP). (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,
(71) 出願人 および
(72) 発明者: 多久島 裕一 (TAKUSHIMA, Yuichi) [JP/JP]; 〒2230062 神奈川県横浜市港北区日吉本町 3-2 4-3 ラベル日吉 I I 3 O 6 号 Kanagawa (JP).

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FIBER LASER USING RARE EARTH-ADDED FIBER AND WIDE BAND LIGHT SOURCE

(54) 発明の名称: 希土類添加ファイバを使用する光ファイバレーザ及び広帯域光源



81... OUTPUT BOARD
71... EXCITING LIGHT SOURCE 1480 nm
66... WDM COUPLER
1060... FIBER

(57) Abstract: Fiber laser comprising, provided in a resonator, an optical fiber having a normal dispersion, an optical fiber having an abnormal dispersion, a rare earth-added optical fiber as a gain medium, and mode synchronizing mechanism, characterized in that at least a rare earth-added optical fiber is included as an optical fiber having a normal dispersion, and the length of a rare earth-added fiber is set to be smaller than that of an optical fiber having an abnormal dispersion.

(57) 要約: 共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、正常分散を有する光ファイバとして少なくとも希土類添加光ファイバを含み、希土類添加ファイバの長さが異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザ。

WO 2005/086299 A1



SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護
が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA,
SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ,
BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE,
BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語
のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

希土類添加ファイバを使用する光ファイバレーザ及び広帯域光源 技術分野

[0001] 本発明は希土類添加ファイバを使用する光ファイバレーザ及び広帯域光源に関するものである。

背景技術

[0002] 波長スペクトルが広帯域で低コヒーレントなパルス光源は、光断層面撮影や光ファイバセンシングといった様々な分野での応用が期待されている。このような特徴を有する光パルスの発生方法として、発光ダイオード(LED)を用いたパルス発生が考えられる。またエルビウム(Er)ドープファイバ(EDF)等を用いた光ファイバアンプから発生する増幅自然放出光(ASE)を光源とすることによって低コヒーレントな光を得ることができる。

しかしLEDでは高強度の光を得ることはできず、光ファイバアンプによるASE光もその波長スペクトルが増幅媒体の発光帯域に制限されてしまう。

[0003] またErドープファイバを増幅媒体に用いたモード同期ファイバレーザにより、波長スペクトルが広帯域な光パルスを発生した例がある(非特許文献1参照)。これは非線形偏波回転現象を受動モードロック機構としたストレッチパルスファイバレーザによりコヒーレンス長の短い広帯域(44nm)な発振を実現したものである。

[0004] 一般にパルスファイバレーザの発振現象を見るとパルスモードとノイズライクモードという2つの発振モードが存在する。パルスモードとは通常のフーリエ変換限界(TL)パルスを発振するモードであり、高エネルギー(一数nJ)かつ超短パルス(サブ100fs)発振が報告されている(非特許文献2参照)。一方、ノイズライクモードとは短パルス成分が数10psの範囲で束状になって存在する発振状態である。上述した広帯域パルス発生の例はノイズライクモードの発振である。ノイズライクモード発振における波長スペクトルは広帯域でその変化が緩やかな点に特徴がある。

[0005] またソリトンパルスを発振するファイバレーザではスペクトルにリップルが生じる場合があるが、ノイズライクモード発振においてはそのような現象は起こらない。またこのノイズライクモード発振におけるパルス光の強度は、平均で10mW、ピーク値で15Wで

あり(非特許文献1参照)、LED光源やASE光源に比較して高強度出力が可能な利点がある。

[0006] しかしながら非特許文献1の例では、発振した波長帯域は増幅媒体であるErの利得帯域に限られており、より広帯域な波長スペクトルを有するパルス光源が望まれている。

[0007] またスーパーコンティニュームを発生させる超短パルスレーザを低分散光ファイバに注入することにより超広帯域光源を構成する方法が従来提案されており、文献(非特許文献3)では波長1100nmから2200nmにわたる広帯域光が得られているが、数ナノメートル程度の細かい周期で15dB程度のリップルが残留しており、前述の応用には不向きであり、超広帯域光発生においてリップルの低減が課題となっている。

非特許文献1: H.Horowitz et al., "Noiselike pulse with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser", Opt. Lett., Vol22, pp.799-801, 1997

非特許文献2: L.B.Nelson et al., "Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser", Opt. Lett., Vol21, pp.1759-1761, 1996

非特許文献3: BR. Washburn et al., "A phase locked frequency comb from an all-fibre supercontinuum source, " Proc. of European Conference on Optical Communication 2003 (ECOC2003), Post-deadline paper Th 4.1.2, Rimini, Italy, Sept. 21-25, 2003

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0008] 本発明は、上述したような光源の広帯域化の要求に応えるためになされたものであり、この発明の目的は、より広帯域な出力特性を有する光源を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0009] 上記目的を達成するため、本発明では広帯域でノイズライクなパルスの発振に適した共振器の分散マップを設計し、1.5 μ m帯で最も広い帯域幅をもつノイズライクレーザを作製した。このようなファイバレーザおよび広帯域光源は、具体的には下記からなっている。

[0010] この発明のファイバレーザの第1の態様は、共振器内に、正常分散を有する光フア

イバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバの長さが前記異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

[0011] この発明のファイバレーザの第2の態様は、共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバにおける出力光スペクトルの中心波長での単位長さあたりの正常分散絶対値が、前記異常分散を有する光ファイバの単位長さあたりの異常分散絶対値よりも大きく設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

[0012] この発明のファイバレーザの第3の態様は、共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加光ファイバにおける非線形係数を γ_1 [1/W/m]、長さを L_1 [m]、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分における実効的な非線形係数を γ_2 [1/W/m]、長さを L_2 [m]、とするとき、非線形比 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ が1より大きいことを特徴とするファイバレーザである。

[0013] この発明のファイバレーザの第4の態様は、前記共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-1\text{ps}^2 \sim +0.2\text{ps}^2$ の範囲内の値となるように調整されることを特徴とするファイバレーザである。

[0014] この発明のファイバレーザの第5の態様は、前記希土類添加光ファイバのコア部分に少なくともエルビウム(Er)イオンが添加されていることを特徴とするファイバレーザである。

[0015] この発明のファイバレーザの第6の態様は、Erが添加された前記希土類添加光ファイバの波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯における吸収係数のピーク値が $10\text{dB}/\text{m} \sim 35\text{dB}/\text{m}$ の範囲

内に設定されていることを特徴とするファイバレーザである。

- [0016] この発明のファイバレーザの第7の態様は、前記共振器における前記希土類添加光ファイバの波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値が $21\text{ps}^2/\text{km}$ 以上であることを特徴とするファイバレーザである。
- [0017] この発明のファイバレーザの第8の態様は、前記希土類添加光ファイバにおける波長 $1.55\mu\text{m}$ での分散値を $D[\text{ps}^2/\text{m}]$ 、波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯での吸収ピーク値を $\alpha[\text{dB}/\text{m}]$ とすると、吸収値と分散値の比 $\alpha/D[\text{dB}/\text{ps}^2]$ の値が500以上であることを特徴とするファイバレーザである。
- [0018] この発明のファイバレーザの第9の態様は、前記共振器に励起光を注入するための励起光源、前記励起光源からの励起光を合波する光合波器を備えており、前記共振器は、希土類添加光ファイバ、シングルモード光ファイバ、偏波ビームスプリッタ、光アイソレータ、偏光板からなっていることを特徴とするファイバレーザである。
- [0019] この発明の広帯域光源の第1の態様は、上述したファイバレーザを用いた広帯域光源であって、前記ファイバレーザにおける出力側に少なくとも高非線形ファイバが接続され、スーパーコンテニューム(SC)光を発生させていることを特徴とする広帯域光源である。
- [0020] この発明の広帯域光パルス発生装置の第1の態様は、強度波形の包絡線が時間的にパルス状となっているノイズライクパルスを発生させるパルス光源と、前記ノイズライクパルスに非線形効果を誘起する非線形媒質とを備え、前記非線形媒質内で、前記ノイズライクパルスがスーパーコンテニューム光を発生することにより広帯域パルス光を発生させる広帯域光パルス発生装置である。
- [0021] この発明の広帯域光パルス発生装置の第2の態様は、前記パルス光源は、共振器内に正常分散媒質と、異常分散媒質と、利得媒体と、モード同期機構を備えたレーザ共振器構造を有することを特徴とする、広帯域光パルス発生装置である。
- [0022] この発明の広帯域光パルス発生装置の第3の態様は、前記正常分散媒質が正常分散を有する光ファイバからなっており、前記異常分散媒質が異常分散を有する光ファイバからなっており、そして、前記利得媒体が希土類添加光ファイバからなっていることを特徴とする、広帯域光パルス発生装置である。

- [0023] この発明の広帯域光パルス発生装置の第4の態様は、前記パルス光源は、強度の包絡線が時間的に一定である雑音光を発生させる雑音光源と、前記雑音光を変調する変調器を備えていることを特徴とする、広帯域光パルス発生装置である。
- [0024] この発明の広帯域光パルス発生装置の第5の態様は、前記非線形媒質が、DSF（分散シフトファイバ）、分散フラットファイバ、フォトニッククリスタルファイバ、または、HNL（高非線形ファイバ）からなっていることを特徴とする、広帯域光パルス発生装置である。
- [0025] この発明のノイズライクパルス発生装置の第1の態様は、持続時間が限られたバースト状の雑音光によって、強度波形の包絡線が時間的にパルス状となっているノイズライクパルスを発生させるノイズライクパルス発生装置であって、強度の包絡線が時間的に一定である雑音光を発生させる雑音光源と、前記雑音光を変調する変調器を備え、前記雑音光を、前記変調器が変調することによって、前記ノイズライクパルスを発生させることを特徴とする、ノイズライクパルス発生装置である。

発明の効果

- [0026] Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回る平坦で広帯域なスペクトルを有するファイバレーザを提供することができる。更に、このファイバレーザを用いることにより、広帯域な光源を提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0027] [図1]図1は、第1実施形態におけるファイバレーザの構成図である。
- [図2]図2は、第1実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。
- [図3]図3は、第1実施形態のファイバレーザにおける出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形を示すグラフである。
- [図4]図4は、第2実施形態におけるファイバレーザの構成図である。
- [図5]図5中(1)は、第2実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。図5中(2)は、第4実施形態のファイバレーザにおける出力光のスペクトルを示すグラフである。
- [図6]図6は、第3実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

[図7]図7は、第3実施形態のファイバレーザにおける出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形を示すグラフである。

[図8]図8は、第4実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

[図9]図9は、第5実施形態におけるファイバレーザの構成図である。

[図10]図10は、レーザファイバの動作条件を示すグラフである。

[図11]図11は、ファイバレーザ中のパルス幅とスペクトル幅の変化を示すグラフである。

[図12]図12は実施形態1のファイバレーザにおける出力光の時間波形を示すグラフである。

[図13]図13は、この発明のレーザの本質的な部分を説明する図である。

[図14]図14は、偏光子として偏波ビームスプリッタを用いた例を示す図である。

[図15]図15は、コリメータレンズをSMFにし、分散値がほぼ零近辺の分散シフトファイバに接続した例を示す図である。

[図16]図16は、ノイズライクモードで発振時のスペクトルを示す図である。図16(a)は励起光パワーが500mWのとき、図16(b)は励起光パワーが1000mWのときをそれぞれ示す。

[図17]図17は、直線状の共振器で構成した例を示す図である。

[図18]図18は、希土類添加光ファイバとしてイットリビウム添加ファイバを用いた例(構成1)である。

[図19]図19は、希土類添加光ファイバとしてイットリビウム添加ファイバを用いた例(構成2)である。

[図20]図20は、ノイズライクパルスを用いたスーパーコンティニューム発生の実験例を示す図である。

[図21]図21は、超短パルスを用いたスーパーコンティニューム発生の実験例を示す図である。

[図22]図22は、ファイバレーザを用いないノイズライクパルス発生の実験構成図である。

[図23]図23は、ファイバレーザを用いないノイズライクパルス発生の実験例を示す

図である。

[図24]図24は、高非線形ファイバへの入力パワーを変化させたときの出力スペクトルを示す図である。

[図25]図25は、その他のノイズライクパルスの一例を示す図である。符号の説明

- [0028] 11 Er添加光ファイバ(EDF)
 21、22、23 分散シフトファイバ(DSF)
 31、32、33 シングルモードファイバ(SMF)
 41 Corning Flexcore1060
 51 高非線形(HNL)ファイバ
 61、65 1/4偏光板
 62 1/2偏光板
 63 偏波ビームスプリッタ(PBS)
 64 アイソレータ(ISO)
 66 光合波器(WDMカプラ)
 71 励起光源
 81 アウトポートポート

発明を実施するための最良の形態

- [0029] 以下に図面を参照して、本発明に係るファイバレーザ、及びそれを用いた広帯域光源の好適な実施の形態を説明する。図面の記載において同一または類似部分には同一または類似な符号を付している。

この発明において、共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-1\text{ps}^2 \sim +0.2\text{ps}^2$ の範囲内の値となるように調整される。その理由は次の通りである。

- [0030] 先ず、異常分散側の累積分散量の上限を、ストレッチパルスレーザ(分散マネジメントソリトン)の理論を援用して求める。下記式で表される分散マップの強度が10を超えるとパルス解が得られにくくなる。

$$S = (\beta_{21} L_1 - \beta_{22} L_2) / T_{\text{FWHM}}^2$$

ここで、 β_{21} 、 L_1 は、正常分散ファイバにおける分散、長さであり、 β_{22} 、 L_2 は、異常分

散ファイバにおける分散、長さである。また、 T_{FWHM} は、パルスの半値全幅である。

- [0031] パルス幅として短めに見積もって200fsとし、 $S=10$ とすると、異常分散側の総分散量として -0.2ps^2 程度になる。分散マネジメントソリトンの理論の適用範囲は、パルスモードの場合であり、安定なパルス解が存在するための必要条件となる。しかし、ノズルライクパルスの場合は厳密なパルス解を持つ必要がないため、異常分散側の総分散量の許容範囲はその5〜10倍程度となり、 -2ps^2 程度になる。従って、上限として50%くらいを考慮して -1ps^2 が求められる。
- [0032] 総分散量が正常分散になると、非線形光学効果による周波数偏移によってパルスの時間幅の広がり方が増強されてしまうため、正常側のトレランスが殆どなく、分散マネジメントをかけた状態で異常分散側の分散量の20%を超える量の正常分散が残留した状態でノイズライクモードでの解を得るのは困難である。従って、実現可能なノイズライクモードのファイバレーザにおいて、共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-1\text{ps}^2 \sim +0.2\text{ps}^2$ の範囲内になるように調整される。
- [0033] 更に、この発明においては、希土類添加光ファイバにおける波長 $1.55\mu\text{m}$ での非線形係数を $\gamma_1[1/\text{W}/\text{m}]$ 、長さを $L_1[\text{m}]$ 、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分の波長 $1.55\mu\text{m}$ における実効的な非線形係数を $\gamma_2[1/\text{W}/\text{m}]$ 、長さを $L_2[\text{m}]$ 、とすると、非線形比 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ が1より大きい。
- [0034] 図10にレーザファイバの動作条件を、パルスエネルギー $E[\text{pJ}]$ と非線形比 γ' の関係として示す。図中、点線より上の領域は不安定モードであり、パルス発振を得ることが出来ない。パルス発振が得られる点線より下(単パルスモード)の領域において、広帯域な光パルスを得るためには、非線形比 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ が1より大きくななければならない。その根拠は、これまでのファイバレーザでは非線形比(図10では横軸の γ')が1以下で設計されており、1を超えところで、スペクトルが広がる効果が顕著になるからである。図10において、従来のファイバレーザでの動作条件を白丸で示す。
- [0035] また、EDFの利得帯域を大きく超える光パルスを発生させるためには、実効的な非線形比 $\gamma'=(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ を1よりも高くする必要がある。但し、 $\gamma_1[1/\text{W}/\text{m}]$ と $L_1[\text{m}]$ は、正常分散ファイバ(EDF)における波長 $1.55\mu\text{m}$ での非線形係数と長さを、

γ 2[1/W/m]とL2[m]は、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分の波長1.55 μ mにおける実効的な非線形係数と長さを表す。

[0036] 数値シミュレーション例を図11に示す。横軸は共振器の長手方向の正規化距離を現しており、0から0.25、0.75から1.0の区間が異常分散ファイバ、0.25から0.75の区間が正常分散ファイバ(EDF)を表す。リング共振器を構成しているため周期的にこの変化を繰り返しており、0.と1.0は同じ点を表す。図11(a)がパルス幅の変化、図11(b)がスペクトル幅の変化を表しているが、非線形比 γ' が1を大きく超えると異常分散ファイバ中の midpoint 付近でスペクトル拡大がおこり、正常分散ファイバ中では狭いスペクトルが保たれる。

[0037] 従って、増幅中はスペクトルが狭くなり利得媒質の帯域制限を超える光パルスが得られる。なお、後述する実施形態1において、非線形比は4程度である。実施形態1では正常分散ファイバであるEDFと他の異常分散ファイバで非線形係数がそれほど大きく変わらないため、広帯域なスペクトルを得るためには異常分散ファイバの長さを正常分散ファイバよりも十分に長くする必要がある。

[0038] 図13はこの発明のレーザの本質的な部分を説明する図である。図13を参照して、この発明のレーザの本質的な部分を取り出して説明する。この図で、光出力を取り出すための光カプラの位置は任意である。また、偏波制御器として、以下に示す実施形態では波長板を用いているが、波長板のほかにもファイバループのようなものなど適宜好適なものを使用することができる。また、図中の偏光子もどのような形態のものでもよく、もし偏光子として偏波ビームスプリッタを用いると、図14のように光出力を得るための光カプラと偏光子を一つに集約することができる。

(実施形態1)

[0039] 先ず、本発明における第1実施形態について説明する。図1はこの発明の第1実施形態のファイバレーザの構成図である。図1に示すように、この形態のファイバレーザは、パルスの進行方向に沿って、分散シフトファイバ(DSF)21、シングルモードファイバ(SMF)31、Er添加光ファイバ(EDF)11、Corning Flexcore(商標名)1060ファイバ41、光合波(WDM)カプラ66、シングルモードファイバ(SMF)32、分散シフトファイバ(DSF)22、 $1/4\lambda$ 偏光板61、 $1/2\lambda$ 偏光板62、偏波ビームスプリッタ(PBS)63、ア

イソレータ(ISO)64、 $1/4\lambda$ 偏光板65が順次配置され、これらを通して、再び分散シフトファイバ(DSF)21に戻るリング形状の共振器からなっている。

[0040] 励起光源71からの励起光は、光合波(WDM)カプラ66を通してCorning Flexcore1060ファイバ41に結合され、後方励起配置によってEr添加光ファイバ(EDF)11をポンプしている。第1実施形態では励起光源71として1480nm帯の励起光源を用いている。また出力光はアウトプットポート81を通して取り出され、光スペクトルアナライザ、またはオートコリレータに入射させて、その波形を観測した。本発明者らは第1実施形態の共振器における各ファイバの分散、並びにEr添加光ファイバ(EDF)の吸収値を考慮して、広帯域でノイズライクなパルス発振を実現するために適した分散マップを設計した。

[0041] 具体的にはEr添加光ファイバ(EDF)11の波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値は、 $38.4\text{ps}^2/\text{km}$ と大きな正常分散を有するEr添加光ファイバ(EDF)を使用し、第1実施形態の共振器における総分散を波長 $1.55\mu\text{m}$ で -0.029ps^2 となるように設計した。この時、第1実施形態の共振器に用いた各光ファイバの長さは、それぞれ、DSF21;1.8m、SMF31;2.4m、EDF11;2.5m、Corning Flexcore1060ファイバ41;3.0m、SMF32;2.5m、DSF22;1.8mであり、総ファイバ長は14.0mとした。

[0042] 上述したように、第1実施形態の共振器では大きな正常分散を有するEDFを使用することにより、正常分散を有するEDF11の長さを異常分散ファイバの長さよりもずっと短くすることができる。これにより異常分散領域での非線形効果の影響が高まり、スペクトル広がりをもっと促進することができる。従って、上述した実施形態に示す構造を備えたファイバレーザによって、ノイズライクモード発振が容易となり、より広帯域な発振が可能となる。

[0043] これを検証するため、実際にこの第1実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを観測したところ、図2に示すように、波長 $1.55\mu\text{m}$ を中心に3dB帯域幅が87nmと平坦で広帯域なスペクトルが得られた。上述した出力スペクトルは、Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回るスペクトルであり、この発明によって、従来のEr添加ファイバを用いたファイバレーザ(帯域幅44nm、非特許文献1参照)よりも広帯域な特性を実現することに成功したことがわかる。この時の出力光強度は72mW、励起光源

71の励起光パワー(波長 $1.48\mu\text{m}$)は 0.5W であった。

- [0044] 励起光パワーを 420mW 以上とすると、偏光板61、62、65を回転させて、容易にモード同期を達成することができた。基本繰り返し周波数は 14.3MHz である。また図3は出力光の非共軸オートコリレータによる自己相関波形である。中心付近に 100フェムト秒 程度の幅を有する成分が観測され、少なくとも数百フェムト秒のパルス幅を有するパルス成分が存在することがわかる。また、下部にある 10ピコ秒 程度の幅を有する台(ペデスタル)がノイズライクパルスの包絡線を表しており、全体としてパルス光を構成していることがわかる。図3から明らかなように、少なくとも数百フェムト秒のパルス幅を有するパルス成分が存在することがわかる。
- [0045] 図12は実施形態1のファイバレーザにおける出力光の時間波形を示すグラフである。即ち、図12は、 100MHz 帯域を有するフォトディテクタを用いて観測された光強度の時間変化である。図12に示すように、 70ナノ秒 間隔でパルスが発生しており、モード同期動作をしていることがわかる。
- [0046] 共振器内での累積正常分散を異常分散ファイバで補償する場合には、第1実施形態に示すように、正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くすることが必要であり、そのためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値絶対値が異常分散ファイバの異常分散より大きくなければならない。
- [0047] 上記第1実施形態においては、異常分散ファイバとして標準的なSMF(波長 $1.55\mu\text{m}$ での分散値 $-21\text{ps}^2/\text{km}$)を用いた。この場合、正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くするためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値が、異常分散ファイバSMFの分散値絶対値 $21\text{ps}^2/\text{km}$ より大きいことが必要である。従って、本第1実施形態におけるEDFの波長 $1.55\mu\text{m}$ での分散値は $21\text{ps}^2/\text{km}$ 以上であることが、広帯域なノイズライクモード発振の観点から望ましい。
- [0048] 共振器内における各分散領域での好適な分散量の絶対値は $0.5 \times (\text{スペクトルの拡大係数}) \div (\text{スペクトル幅})^2$ で求めることができる。ここでスペクトルの拡大係数とは、異常分散領域でスペクトルの最大値と正常分散領域でのスペクトルの最小値の比である。本実施形態のようにノイズライクパルスで、実効的なスペクトル幅が 60nm 程度であるとき、好適な分散値は 0.05 から 0.10ps^2 程度の範囲内の値になる。本実施

形態では、EDF11の波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値は $38.4\text{ps}^2/\text{km}$ 、使用長は 2.5m であり、正常分散領域での総分散は 0.096ps^2 となる。

[0049] 実際の共振器の設計にあたっては、上述した好適な分散値になるように、各分散領域ファイバの分散値に応じて、その長さが決定される。本実施形態のようなノイズライクモードでの発振では、正常分散ファイバであるEDFでの分散値をなるべく大きくして、異常分散ファイバの長さに比して正常分散ファイバの長さをより短くすることが有効である。しかしながらEDFの短尺化により、EDFで得られる出力が減少するため、短尺化に応じてEDFでの吸収係数(単位長さあたりの吸収値)を高めて吸収条長積(吸収係数と長さの積)を一定に保つ必要がある。

[0050] 本第1実施形態におけるEDFの使用長、波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯での吸収ピーク値は、それぞれ 2.5m 、 $23.7\text{dB}/\text{m}$ であり、従って吸収条長積は 59.25dB となる。本実施形態における吸収条長積は、十分なレーザ出力を得る観点から、 50dB より大きい、より好ましくは 55dB より大きい値であることが望ましい。上述したところから明らかなように、EDFにおける分散値と吸収係数との間には、好適なバランスが存在していると言える。EDFにおける波長 $1.55\mu\text{m}$ での分散値を $D[\text{ps}^2/\text{m}]$ 、波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯での吸収ピーク値を $\alpha[\text{dB}/\text{m}]$ とする。正常分散領域での総分散を 0.10ps^2 に設定し、吸収条長積を 50dB 以上とすると、EDFの必要長 $L[\text{m}]$ は $L=0.10/D$ で決まり、吸収値と分散値の比 α/D は $500[\text{dB}/\text{ps}^2]$ より大きいことが好適条件となる。

[0051] 上述のように、吸収値と分散値の比 α/D を好適な値に保ちつつ、 α と D を増加させることが広帯域なノイズライクモードでの発振には有効である。しかしながら、 α を拡大するために過剰にErイオンを添加するとイオン間相互作用による変換効率の低下(濃度消光)を引き起こし、十分な出力を得られなくなる。従って、変換効率を良好に保つためには、Er濃度(吸収係数)がある値を超えて大きくならないように、上限値が存在する。本発明者らは吸収係数の異なるEDFを作製し、 $1.48\mu\text{m}$ 双方向励起配置で励起光から信号光へのパワー変換効率を判定し比較したところ、吸収ピーク値が $35\text{dB}/\text{m}$ を超えると顕著なパワー変換効率の低下が観測された。

[0052] そのため良好な変換効率を維持するためには、吸収ピーク値は $35\text{dB}/\text{m}$ 以下であることが好ましい。更に、濃度消光による変換効率の低下を抑制するために、EDFに

はアルミニウム (Al) を高濃度に共添加することが望ましい。本実施形態のEDF11においては、4.8wt%以上の濃度のAlをErと共に添加している。濃度消光抑制の観点からは、Alを3wt%以上、より好ましくはAlを4wt%以上の濃度で共添加することが好ましい。

- [0053] また上述のように正常分散ファイバの長さを異常分散ファイバの長さよりも短くするためには、正常分散ファイバであるEDFの分散値が異常分散ファイバであるSMFの分散値絶対値 $21\text{ps}^2/\text{km}$ より大きいことが必要である。従って正常分散領域での総分散を 0.10ps^2 とし、吸収条長積を50dB以上に設定すると、必要な吸収ピーク値は 10.5dB/m 以上となる。従って本実施形態では、吸収ピーク値は、少なくとも 10dB/m 以上であることが必要であることがわかる。

(実施形態2)

- [0054] 本発明における第2実施形態について説明する。図4は第2実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを高非線形 (HNL) ファイバ51に入射させて、スーパーコンテニューム (SC) 発生実験を行った。HNLファイバ51の波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値は $-0.60\text{ps}^2/\text{km}$ 、零分散波長は $1.532\mu\text{m}$ 、波長 $1.55\mu\text{m}$ における非線形定数は $20/W/\text{km}$ 、ファイバ長は 1km である。
- [0055] ノイズライクパルスが平坦なスペクトルのスーパーコンテニュームに向いていることを数値シミュレーションによって示す。ノイズライクパルスに限らず雑音光の強度波形はスペクトル幅の逆数程度の細かい構造を持ち、擬似的に短パルスの集まりとみなすことが出来る。よって、十分な強度が得られれば、超短パルスと同様にスーパーコンテニューム発生が可能となる。ここでは、ノイズライクパルスのモデルとして持続時間が限られたバースト状の雑音光を考え、光ファイバ中を伝搬するときの波形とスペクトルの変化について検討した。
- [0056] 図20に計算例を示す。図20で入射光は、スペクトル幅が 20nm のノイズライクパルスとし、強度包絡線の時間幅を 33ps とした。このノイズライクパルス光は時間幅が $100\sim 300\text{fs}$ 程度の短パルスの集まりとみなすことができる。パルスあたりのエネルギーは

1.5 nJとし、このときのピークパワーは約200 Wとなる。スーパーコンティニューム発生用のファイバとしては、波長1550nmで $-0.74 \text{ ps}^2/\text{km}$ の分散値を持つ高非線形ファイバとした。計算には5次までの高次分散と非線形遅延応答・自己急峻効果等の高次項を考慮した。また、比較のために同じ程度のピークパワーとスペクトル幅を持つ超短パルスでスーパーコンティニューム発生を行った場合を図21に示す。これは、通常のパルスモードで発振するファイバレーザからのスーパーコンティニューム発生に対応する。パルス幅は300fsで、ピークパワーは200Wとした。

[0057] まず、ノイズライクパルスの場合(図20)について述べる。高非線形ファイバ中を1 m程度伝搬すると、自己位相変調・自己ラマン増幅によりスペクトルは広がり、ノイズライクパルスを構成する細かいピークはパルス圧縮を受ける。更に伝搬すると非線形光学効果と分散により波形は著しく変化するが、波形が崩れても雑音光としての性質は保持され、超短パルスの集まりとして機能する。このため、比較的長い距離(数十〜数百m)を伝搬してもスペクトルは広がり続ける。また、スペクトルは雑音状になるが、ほぼ均一に分布し、複数の雑音状パルスの平均をとると平坦なスペクトルが得られる。

[0058] これに対して通常の超短パルスを用いた場合(図21)について述べる。先ほどと同様に、高非線形ファイバ中を1m程度伝搬すると自己位相変調・自己ラマン増幅によりスペクトルは広がり、パルス圧縮を受ける。しかし、通常の超短パルス光では4 m程度伝搬すると、パルスの時間波形が崩れてピークパワーが低くなり、スペクトル広がりが止まってしまう。また、スペクトルのリプルが15dB以上ある。これは、本計算例で特別に見られる現象ではなく、超短パルスを用いたスーパーコンティニューム発生における一般的な性質である。以上のように、ノイズライクパルスを用いたスーパーコンティニューム発生は、超短パルスを用いたものに比べて、スペクトルの拡散効率(非線形相互作用長が長く取れる)、スペクトルの平坦性に優れ、超広帯域光源としては圧倒的な優位性を持つ。

[0059] なお、図1, 4に示した例では、コリメータレンズの手前のファイバタイプまで指定しているが、ファイバの種類にはあまり敏感ではない。ちなみに、図15に示すように、コリメータレンズをSMFにし、分散値がほぼ零近辺の分散シフトファイバと接続した場合

においてもノイズライクモードで発振する。正常分散ファイバの総分散量は 0.118ps^2 で、異常分散ファイバの総分散量は -0.140ps^2 で、総分散量は -0.022ps^2 である。

[0060] 発振スペクトルを図16に示す。励起光パワーが500mWのとき半値全幅は81nm、1Wのとき74nmである。この共振器にSMFを20m追加してもノイズライクモードで発振する。追加した状態での総分散量は -0.32ps^2 程度である。追加した状態でスペクトル形状はほぼ同じで半値全幅は少し狭くなる(70nm程度)。このように総分散の絶対値が大きな状態では、パルスモードでは発振することは非常に難しく、発振したとしてもスペクトル幅は非常に狭くなる(参考文献:IEEE Journal of Quantum Electronics, 30(6), 1469, 1994)。しかし、ノイズライクモードでは、分散に対するトレランスが高く、発振可能である。この点は本発明の大きな利点である。

[0061] 第2実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを図5(1)に示す。第2実施形態のファイバレーザにおいて950nmの帯域を有するSC光が得られた。残留スペクトル成分が残らずに均質にスペクトルが広がっていることから短パルス成分が束状であることが推測される。また、スペクトルに細かいリプルが存在しない点がノイズライクパルスからのSC光発生の特徴である。

(実施形態3)

[0062] 本発明における第3実施形態について説明する。図6は第3実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトポート81を通して取り出されたノイズライクパルスをSMF33に入射して、パルスの分散耐性を調べた。

[0063] この時、SMF33の長さは1.6km、分散量は -34ps^2 である。図7に1.6kmSMF33伝送後の自己相関波形を示す。サブピコ秒のフーリエ変換限界(TL)パルスでは、SMF1.6km伝搬後、時間幅の短いパルス成分が残ることは考えにくい、図7では短パルス成分が残留していることがわかる。SMFへの入力パワーを変えても同様の自己相関波形が得られることからソリトン成分が伝搬しているのではないことが明らかである。

(実施形態4)

[0064] 本発明における第4実施形態について説明する。図8は第4実施形態のファイバレーザの構成図である。このファイバレーザの共振器の構成、並びに各ファイバの条長は、上述した第1実施形態における共振器と同一であり、第1実施形態におけるアウトポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを、先ずSMF33に入射した後、高非線形(HNL)ファイバ51に入射させ、スーパーコンテニューム(SC)の発生実験を行った。

[0065] 第4実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを図5(2)に示す。第4実施形態のファイバレーザにおいて700nmの帯域幅を有するSC光が観測された。これら第3、第4実施形態の結果からノイズライクパルスにおいて、TLパルスでは見られない分散耐性があることが確認された。

(実施形態5)

[0066] 本発明における第5実施形態について説明する。図9は第5実施形態のファイバレーザの構成図である。図9に示すように、この形態のファイバレーザは、パルスの進行方向に沿って、分散シフトファイバ(DSF)21、シングルモードファイバ(SMF)31、Er添加光ファイバ(EDF)11、DSF23、光合波(WDM)カプラ66、SMF32、DSF22、 $1/4\lambda$ 偏光板61、 $1/2\lambda$ 偏光板62、偏波ビームスプリッタ(PBS)63、アイソレータ(ISO)64、 $1/4\lambda$ 偏光板65が順次配置され、これらを通り、再びDSF21に戻るリング形状の共振器からなっている。励起光源71からの励起光は、WDMカプラ66を通してDSF23に結合され、後方励起配置でEDF11をポンプしている。

[0067] 第5実施形態では、励起光源71として1480nm帯の励起光源を用いている。また出力光はアウトポート81を通して取り出され、光スペクトルアナライザ、またはオートコリレータに入射させて、その波形を観測した。EDF11の波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値は、 $38.4\text{ps}^2/\text{km}$ と大きな正常分散を有するEDFを使用し、第5実施形態の共振器における総分散を、波長 $1.5\mu\text{m}$ で -0.0027ps^2 となるように設計した。

[0068] この時、第5実施形態の共振器に用いた各光ファイバの長さは、それぞれ、DSF21;2.0m、SMF31;2.4m、EDF11;2.5m、DSF23;3.0m、SMF32;2.5m、DSF22;2.0m、総ファイバ長は14.0mとなった。この第5実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルを観測したところ、上述した第1実施形態と同様に、波長 $1.55\mu\text{m}$

mを中心に3dB帯域幅が87nmと平坦で広帯域なスペクトルが得られた。

- [0069] またアウトポート81を通して取り出されたノイズライクパルスを高非線形(HNL)ファイバ51に入射させて、スーパーコンテニューム(SC)発生実験を行った。HNLファイバ51の波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値は $-0.60\text{ps}^2/\text{km}$ 、零分散波長は $1.532\mu\text{m}$ 、波長 $1.55\mu\text{m}$ における非線形定数は $20/\text{W}/\text{km}$ 、ファイバ長は1kmである。この第5実施形態のファイバレーザにおける出力スペクトルも上述した第2実施形態における出力スペクトルと同様な950nmの帯域を有するSC光が得られた。
- [0070] 上述した第5実施形態の共振器における総分散は、波長 $1.55\mu\text{m}$ で -0.0027ps^2 となるように設定した。また上述した第1から第4実施形態の共振器における総分散は、波長 $1.55\mu\text{m}$ で -0.029ps^2 となるように設定した。この総分散量は、零近辺が好ましく、正常分散側にトレランスがあまりないため、本実施形態では、総分散が僅かに異常分散となる設定とした。
- [0071] 以上に示した実施形態では共振器をリング構成にしているが、直線状の共振器でも構成可能である。図17にその構成の一例を示す。2枚の鏡により直線状の共振器を構成し、鏡の間に利得を持つ希土類添加ファイバと分散補償を行うファイバによりレーザ発振が可能となる。また、上述した手順で分散値を設定するとノイズライクモードで発振可能である。偏波制御器として、この例では波長板を用いているが、波長板以外の偏波制御器、例えばファイバループやファラデー回転子などを用いることができる。
- [0072] なお、本発明は上記の実施形態に限定されるものではない。例えば上記実施形態における希土類添加光ファイバとしてEr添加光ファイバを用いたが、他の希土類元素、例えばYb、Nd、Pr、Tb、Sm、Ho等が添加された光ファイバであってもよい。適宜好適な物を選ぶことができる。図18、19は、イットリビウム添加ファイバを用いた例を示す図である。この例によると、波長 $1\mu\text{m}$ 近辺でノイズライクモードで発振する。波長 $1.2\mu\text{m}$ 以下の短波長帯では熔融石英を用いた光ファイバは大きな正常分散を持つため、共振器内の分散値を補償するために特殊な光ファイバが必要となる。
- [0073] この例では、フォトニック結晶構造の構造分散を利用して $1.2\mu\text{m}$ 以下の短波長帯で異常分散を実現するフォトニック結晶ファイバ(参考文献:OSA Optics Letters,

vol. 23, 1662, 1998)を用いており、共振器の分散値を前述の設計指針に合わせることに成功している。また希土類添加ファイバとして、通常の単一モードファイバに希土類を添加したものだけでなく、高出力にするために2重のクラッド構造を持つダブルクラッドファイバ(参考文献:IEEE Journal of Quantum Electronics, 33(7), 1049, 1997)を用いることも可能であり、高出力の励起用光源と組み合わせて使用することにより、1Wを超える出力を得ることも可能である。

[0074] また上記実施形態における共振器を構成する希土類添加光ファイバ以外の光ファイバとして、SMF、DSF、Corning Flexcore1060を用いたが、これらファイバの種類、並びに各ファイバの長さは実施形態に限定されるものではなく、希土類添加光ファイバの分散値、吸収値及び希土類添加光ファイバ以外の光ファイバの分散値に応じて、共振器の分散マップが好適になるように適宜決定されるものである。

[0075] 本実施形態では異常分散ファイバとしてSMFを用いたが、SMFに限定されるものではなく、SMFよりも分散絶対値を下げた異常分散ファイバを用い、異常分散ファイバの長さを長くすることで、スペクトルの広がりをもっと強調できる。また励起方法は波長 $1.48\mu\text{m}$ 励起光の後方励起配置としたが、もちろんこの励起波長、励起配置に限定されるものではなく、例えば波長 $0.98\mu\text{m}$ 励起光、前方励起配置等の組み合わせを採用してもよい。

[0076] さらに上記実施形態ではモード同期手段として、偏光板と偏波ビームスプリッタを用いたが、この形態に限定されるものではない。他の好適な手段としては、半導体やカーボンナノチューブなどで構成される可飽和吸収体を用いたものがあげられる。また、共振器の形態としてはリング共振器に限定されるものではなく、レーザ発振が可能な共振器から適宜好適に選択される。

[0077] 更に、ファイバレーザからの出力光を用いたSC発生の手段として高非線形ファイバを用いたが、この形態に限定されるものではなく他のファイバ、例えば分散シフトファイバ、分散フラットファイバ、フォトニッククリスタルファイバであってもよい。

[0078] 更に、雑音光からでもノイズライクパルスを発生させ、そのパルスを用いてスーパーコンティニュームによる超広帯域光を発生することができる。即ち、まず、ファイバレーザの代わりに雑音光源としてASE光源を用い、その雑音光を変調してノイズライクパ

ルスを発生させる。このようにして発生したノイズライクパルスによってもスーパーコンティニューム発生を行うことができる。以下にASE(amplified spontaneous emission)光源などの一般的な雑音光(インコヒーレント光)で代用する場合の原理構造図を図22に示す。

- [0079] この場合スペクトル幅はインコヒーレント光源の帯域幅で決まる。また、出力を増幅して高非線形ファイバに注入すれば、スーパーコンティニューム発生が可能である。実験例を図23に示す。エルビウム添加光ファイバ増幅器を用いたASE光源からの雑音光を電界効果吸収型光変調器(EA変調器)を用いて変調し、時間幅が33 psのバースト状雑音光を発生させた。これを高出力光増幅器を用いて増幅し、長さ60 mの高非線形ファイバに注入してSC発生を行った。出力スペクトルは1700 nmより短波長側では光スペクトルアナライザを用いて測定し、長波長側では分光器を用いて測定した。
- [0080] 本実施形態では、雑音光としてASE光源を使用した。ASE光源だけでなく、連続的な雑音光を発生させるLEDやSLDなどを光源として用いてもよい。上記のように、ノイズライクパルスは、持続時間が限られたバースト状の雑音光で、時間的に強度波形の包絡線がパルス状となっているものであるため、時間的に強度の包絡線が一定の雑音光を変調することによっても得ることができる。
- [0081] これまで、ノイズライクパルスの例として、持続時間が数10ps程度のものについてあげてきたが、本発明によるノイズライクパルスはこれに限らない。図25にその他のノイズライクパルスの一例を示す。
- [0082] このパルス波形は、900mの共振器長でノイズライクパルスの解を持つよう、共振器の総分散量が調整された、Erドープファイバを増幅媒体に用いたモード同期ファイバレーザにおいて得られたものである。この場合、図示されたように、10ns程度の長い持続時間で、時間的に比較的一定な強度波形の包絡線を持ったスクエアタイプのノイズライクパルスが得られる。このように、持続時間の長いノイズライクパルスを用いても、スーパーコンティニュームによる広帯域化が可能である。
- [0083] 図24は、高非線形ファイバへの入力パワーを変化させたときの出力スペクトルである。入力パワーが1.6 Wの時、1178 nmから2134 nmの範囲でスペクトル密度が-10

dBm/nmを超えており、従来のSC光に比べて10〜20 dB程度高い強度が得られた。また、従来のSC発生で見られるようなスペクトルのリップルは無い。また、スペクトル形状も比較的安定であり、全スペクトル帯域で安定度は0.1 dB/hour以下である。

[0084] 本発明により、Er添加ファイバの利得帯域幅を大きく上回る平坦で広帯域なスペクトルを有するファイバレーザを実現することができ、このファイバレーザを用いることにより、広帯域な光源を供給することができる。

請求の範囲

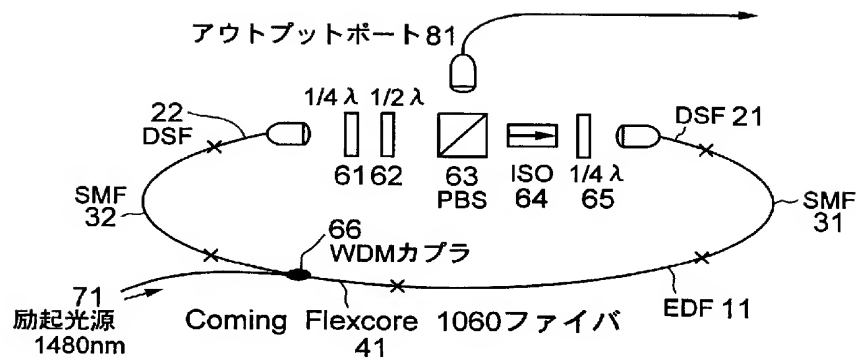
- [1] 共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバの長さが前記異常分散を有する光ファイバの長さよりも短く設定されていることを特徴とするファイバレーザ。
- [2] 共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加ファイバにおける出力光スペクトルの中心波長での単位長さあたりの正常分散絶対値が、前記異常分散を有する光ファイバの単位長さあたりの異常分散絶対値よりも大きく設定されていることを特徴とするファイバレーザ。
- [3] 共振器内に、正常分散を有する光ファイバと、異常分散を有する光ファイバと、利得媒体としての希土類添加光ファイバと、モード同期機構とを備えたファイバレーザであって、前記正常分散を有する光ファイバとして少なくとも前記希土類添加光ファイバを含み、前記希土類添加光ファイバにおける非線形係数を γ_1 [1/W/m]、長さを L_1 [m]、異常分散ファイバを含む共振器を構成する他の部分における実効的な非線形係数を γ_2 [1/W/m]、長さを L_2 [m]、とすると、非線形比 $(\gamma_2 L_2)/(\gamma_1 L_1)$ が1より大きいことを特徴とするファイバレーザ。
- [4] 前記共振器における出力光スペクトルの中心波長における総分散が $-1\text{ps}^2 \sim +0.2\text{ps}^2$ の範囲内の値となるように調整されることを特徴とする、請求項1から3の何れか1項に記載のファイバレーザ。
- [5] 前記希土類添加光ファイバのコア部分に少なくともエルビウム (Er) イオンが添加されていることを特徴とする、請求項1から4の何れか1項に記載のファイバレーザ。
- [6] Erが添加された前記希土類添加光ファイバの波長 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 帯における吸収係数のピーク値が $10\text{dB/m} \sim 35\text{dB/m}$ の範囲内に設定されていることを特徴とする、請求項5に記載のファイバレーザ。
- [7] 前記共振器における前記希土類添加光ファイバの波長 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ における分散値が

- 21ps²/km以上であることを特徴とする、請求項5または6に記載のファイバレーザ。
- [8] 前記希土類添加光ファイバにおける波長1.55 μ mでの分散値をD[ps²/m]、波長1.53 μ m帯での吸収ピーク値を α [dB/m]とすると、吸収値と分散値の比 α/D [dB/ps²]の値が500以上であることを特徴とする、請求項5から7の何れか1項に記載のファイバレーザ。
- [9] 前記共振器に励起光を注入するための励起光源、前記励起光源からの励起光を合波する光合波器を備えており、前記共振器は、希土類添加光ファイバ、シングルモード光ファイバ、偏波ビームスプリッタ、光アイソレータ、偏光板からなっていることを特徴とする、請求項1から8の何れか1項に記載のファイバレーザ。
- [10] 請求項1から9の何れか1項に記載のファイバレーザを用いた広帯域光源であって、前記ファイバレーザにおける出力側に少なくとも高非線形ファイバが接続され、スーパーコンティニューム(SC)光を発生させていることを特徴とする広帯域光源。
- [11] 強度波形の包絡線が時間的にパルス状となっているノイズライクパルスが発生させるパルス光源と、前記ノイズライクパルスに非線形効果を誘起する非線形媒質とを備え、前記非線形媒質内で、前記ノイズライクパルスがスーパーコンティニューム光を発生することにより広帯域パルス光が発生させる広帯域光パルス発生装置。
- [12] 前記パルス光源は、共振器内に正常分散媒質と、異常分散媒質と、利得媒体と、モード同期機構を備えたレーザ共振器構造を有することを特徴とする、請求項11に記載の広帯域光パルス発生装置。
- [13] 前記正常分散媒質が正常分散を有する光ファイバからなっており、前記異常分散媒質が異常分散を有する光ファイバからなっており、そして、前記利得媒体が希土類添加光ファイバからなっていることを特徴とする、請求項12に記載の広帯域光パルス発生装置。
- [14] 前記パルス光源は、強度の包絡線が時間的に一定である雑音光が発生させる雑音光源と、前記雑音光を変調する変調器を備えていることを特徴とする、請求項11に記載の広帯域光パルス発生装置。
- [15] 前記非線形媒質が、DSF(分散シフトファイバ)、分散フラットファイバ、フォトニッククリスタルファイバ、または、HNL(高非線形ファイバ)からなっていることを特徴とする、

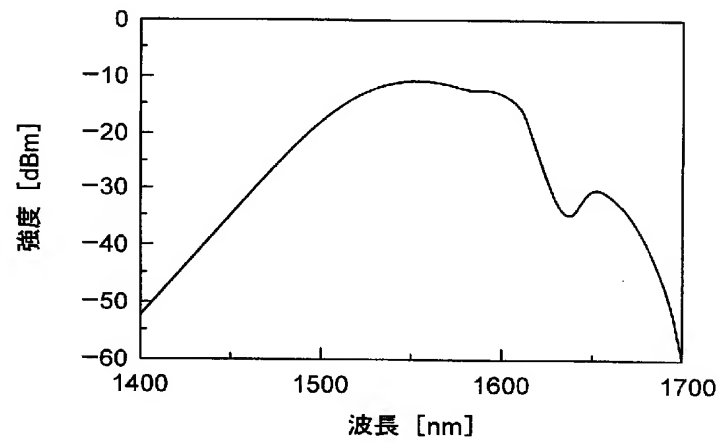
請求項11に記載の広帯域光パルス発生装置。

- [16] 持続時間が限られたバースト状の雑音光によって、強度波形の包絡線が時間的にパルス状となっているノイズライクパルスを発生させるノイズライクパルス発生装置であって、強度の包絡線が時間的に一定である雑音光を発生させる雑音光源と、前記雑音光を変調する変調器を備え、前記雑音光を、前記変調器が変調することによって、前記ノイズライクパルスを発生させることを特徴とする、ノイズライクパルス発生装置。

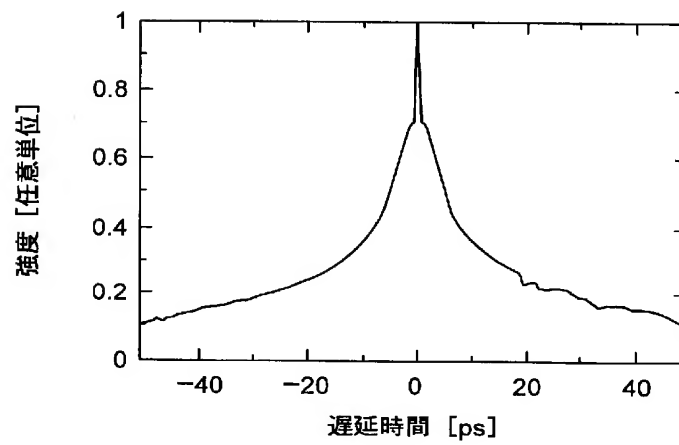
[図1]



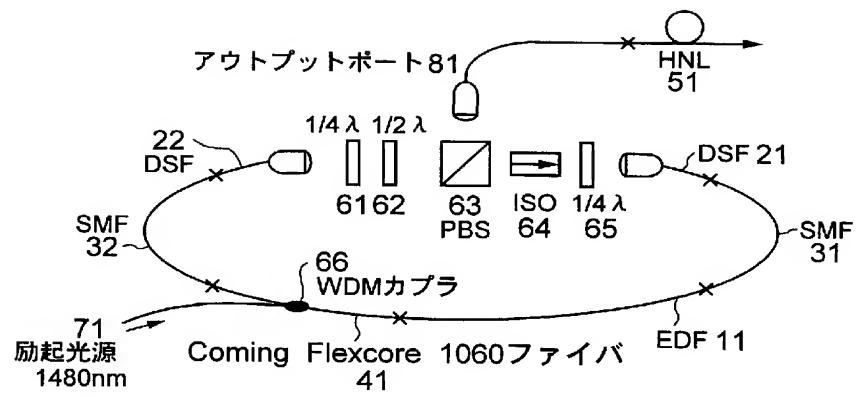
[図2]



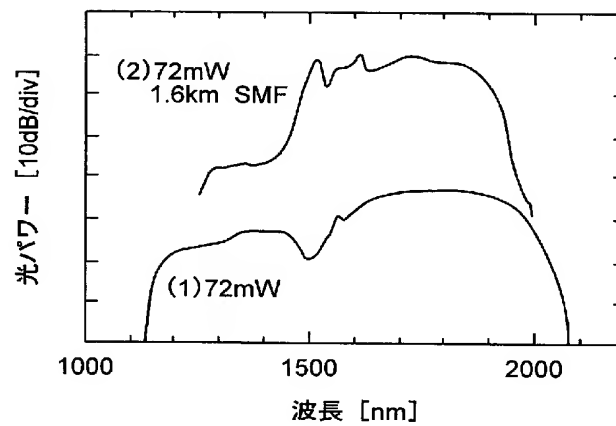
[図3]



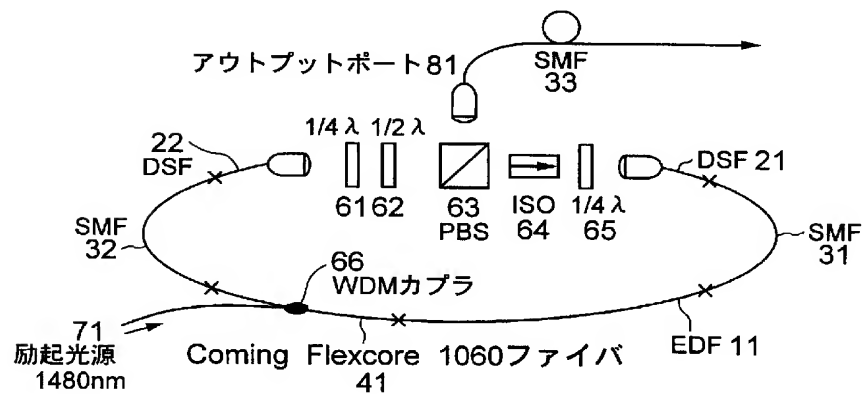
[図4]



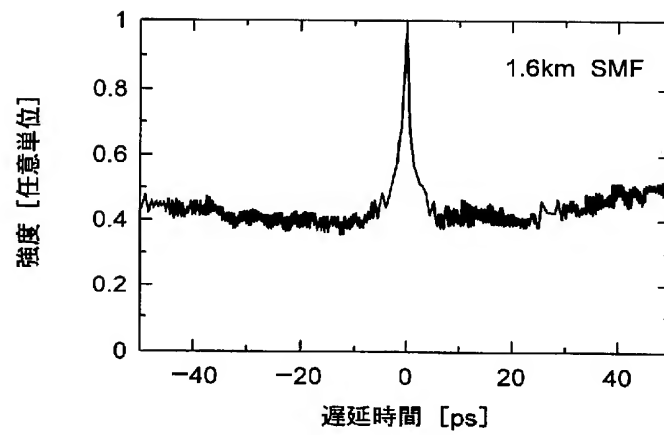
[図5]



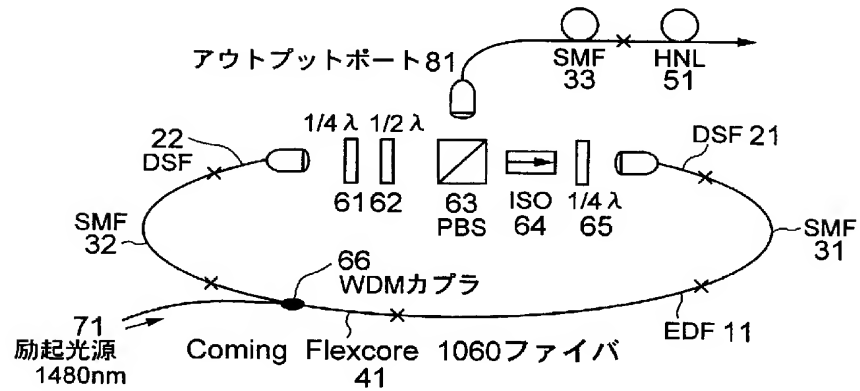
[図6]



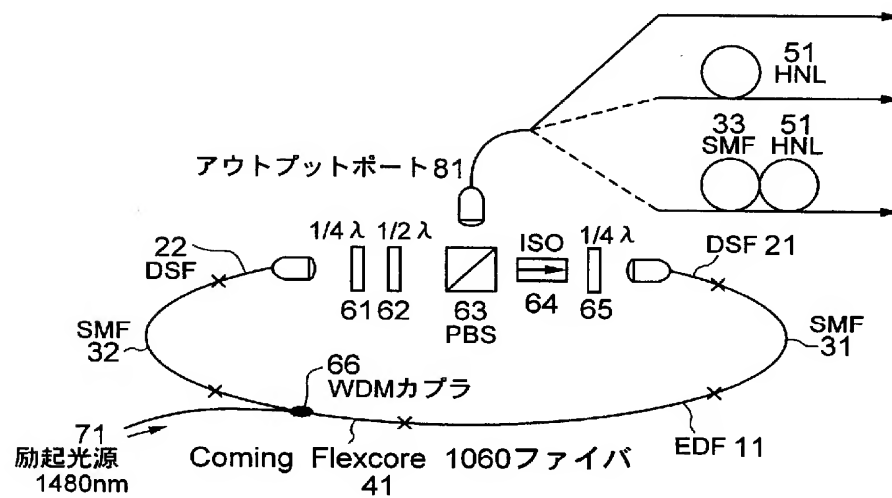
[凶7]



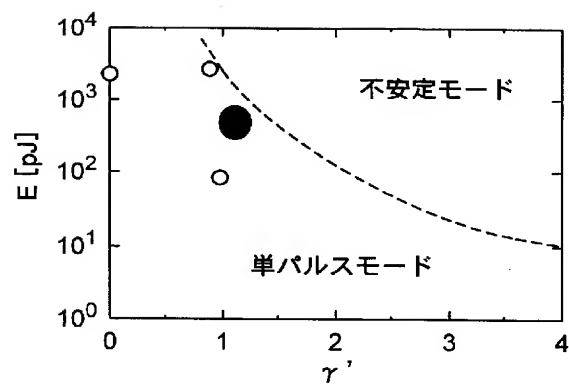
[図8]



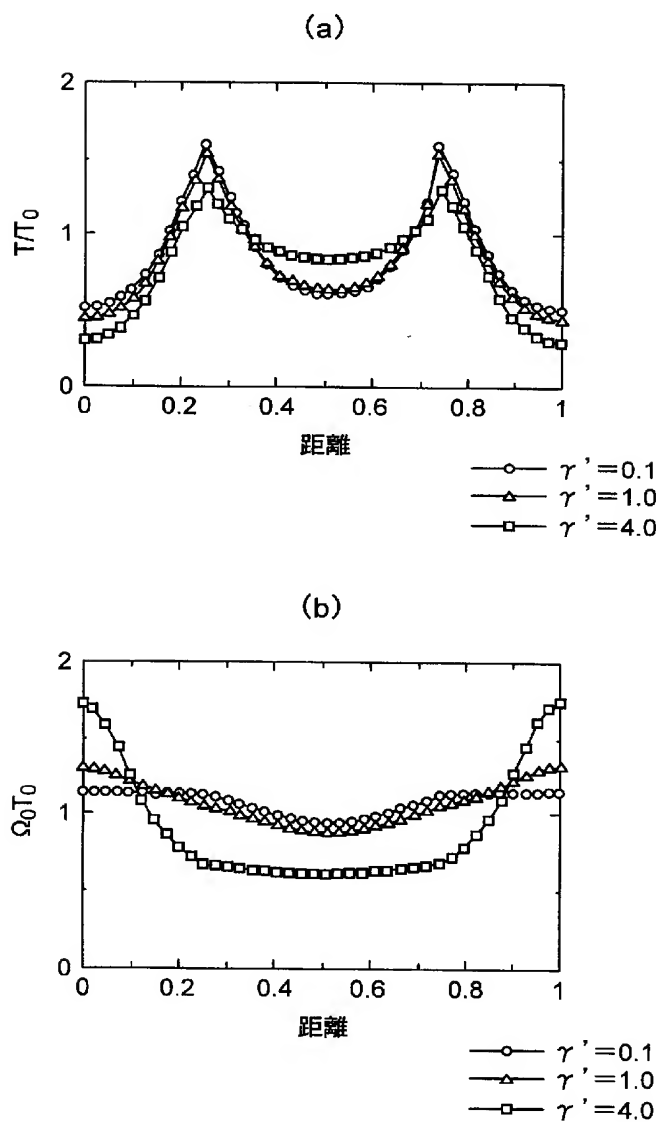
[図9]



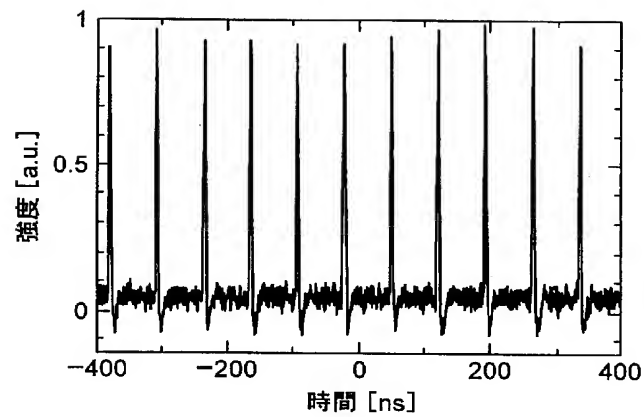
[図10]



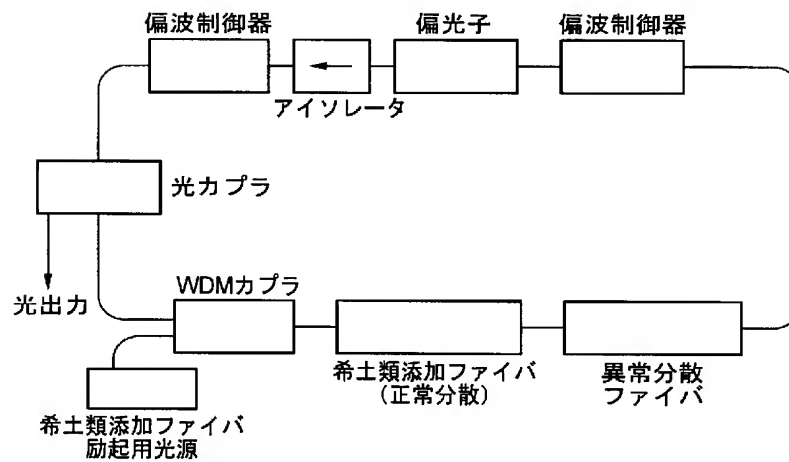
[図11]



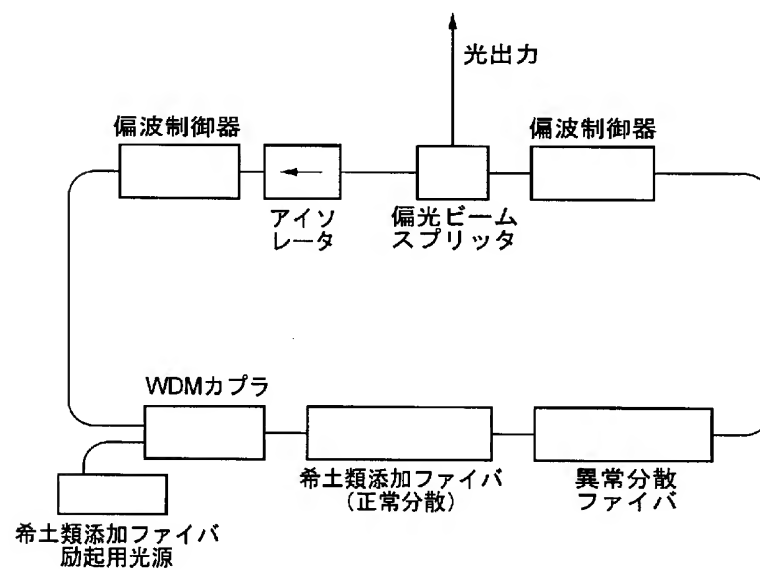
[図12]



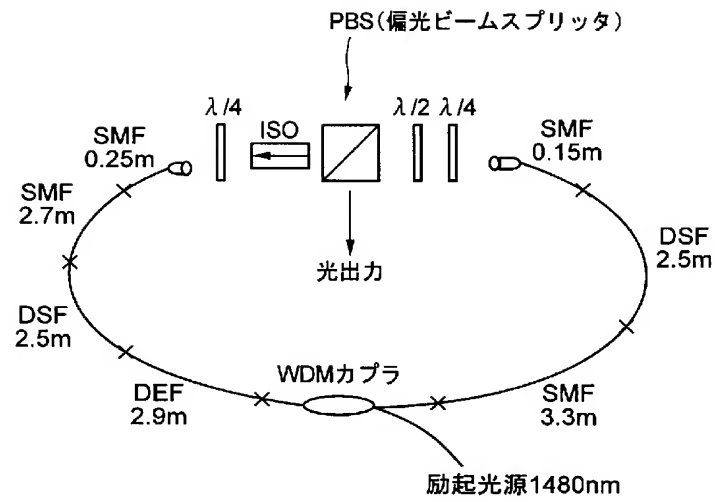
[図13]



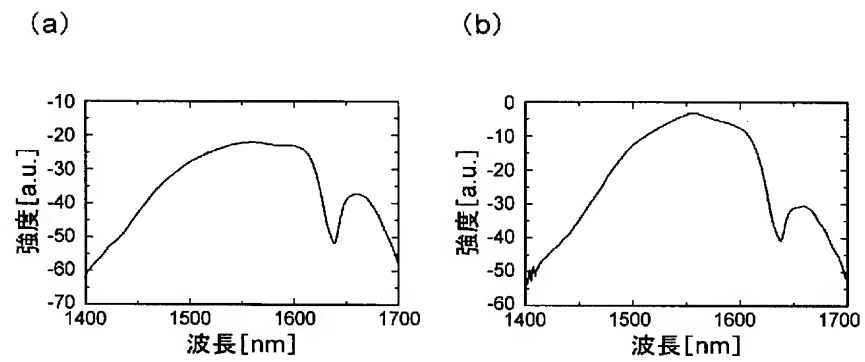
[図14]



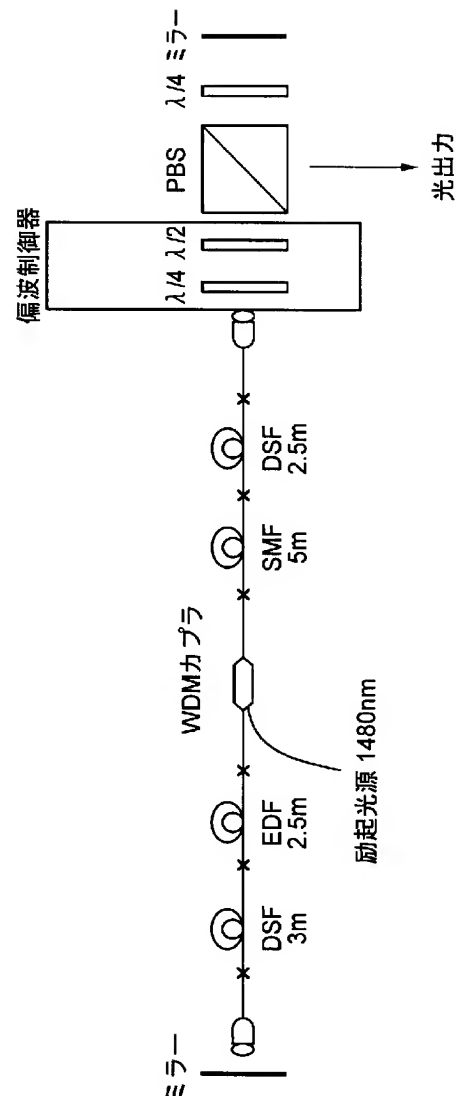
[図15]



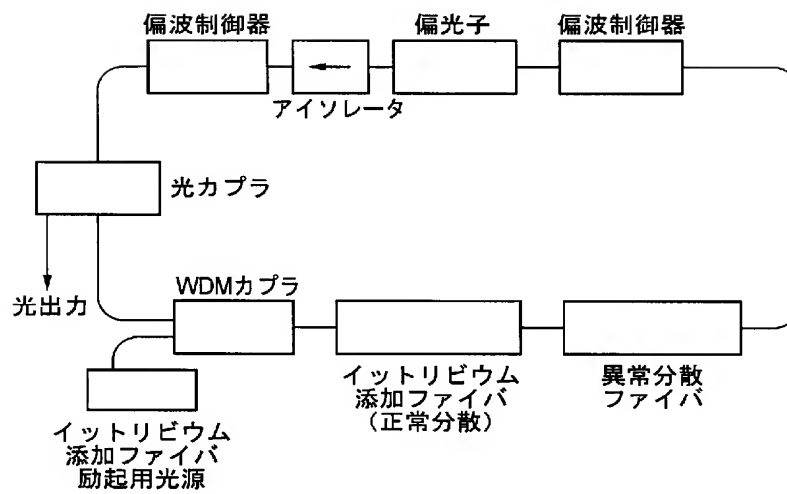
[図16]



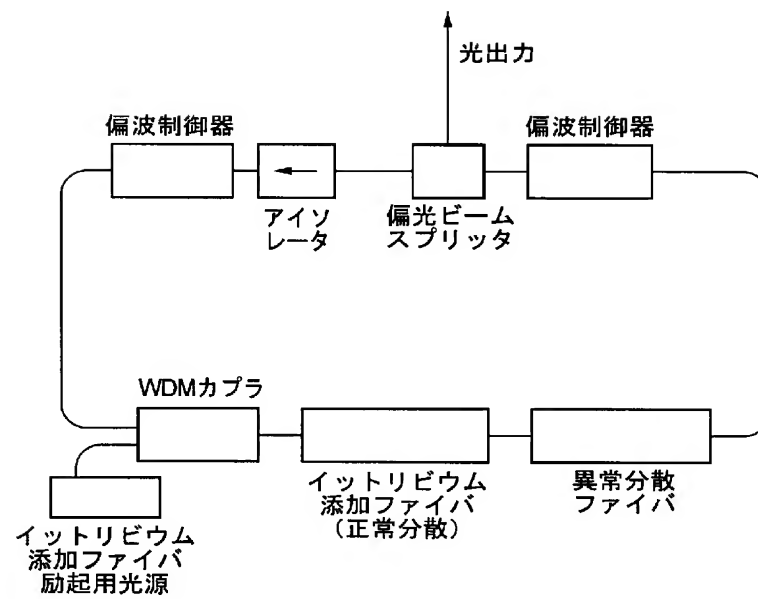
[図17]



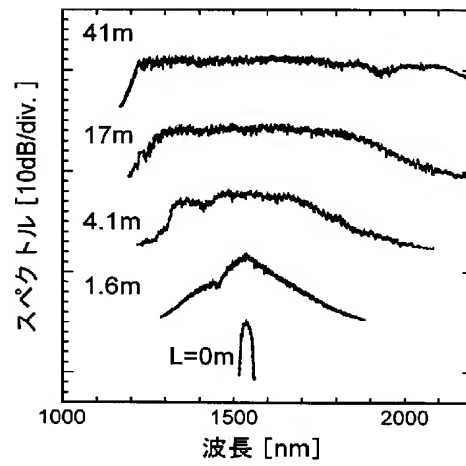
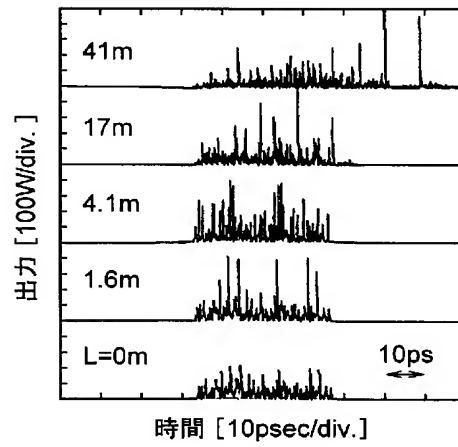
[図18]



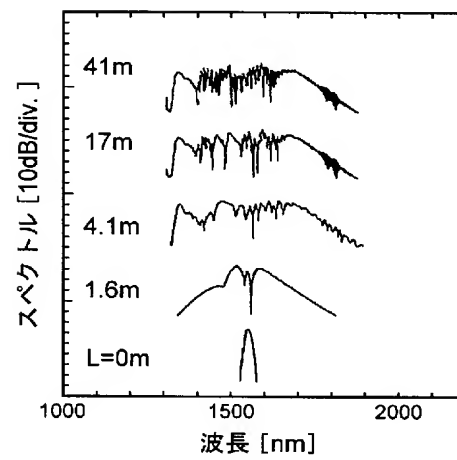
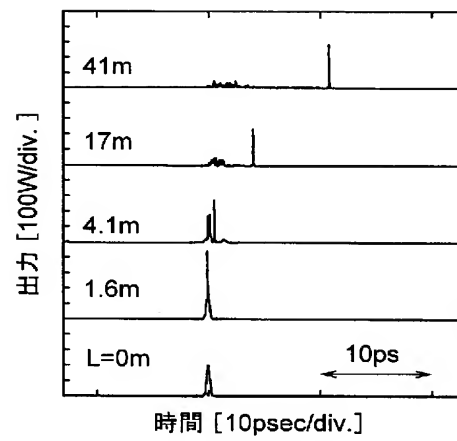
[図19]



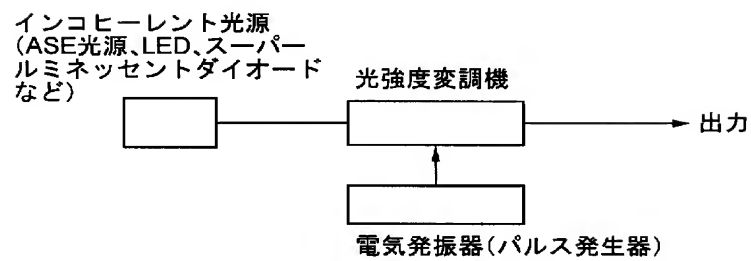
[図20]



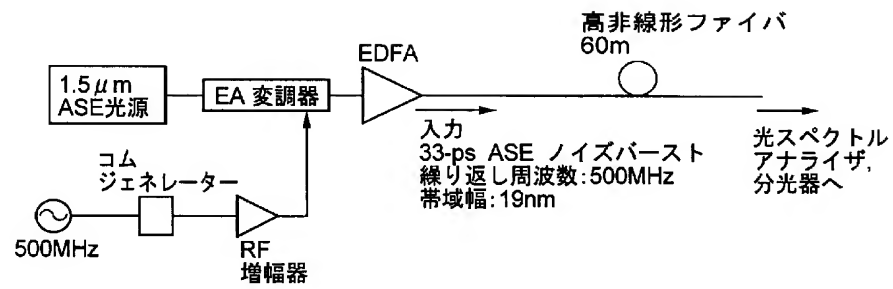
[図21]



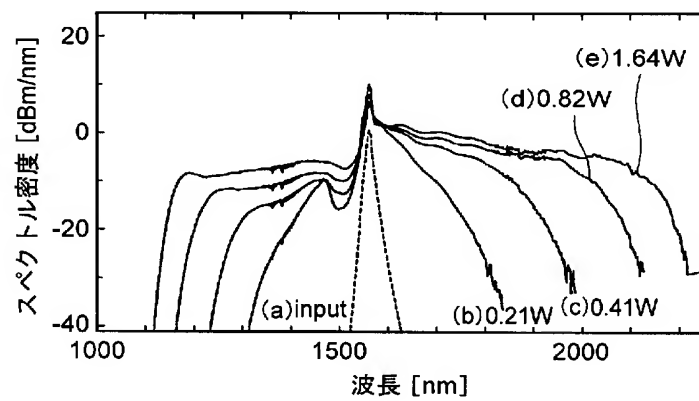
[図22]



[図23]



[図24]



[図25]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003785

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl.⁷ H01S3/06, 3/098

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ H01S3/00-3/30

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2005
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2005	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 4-357892 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 10 December, 1992 (10.12.92), Full text; all drawings (Family: none)	1-9 10
X Y	KANG J.U., Broadband quasi-stationary pulses in mode-locked fiber ring laser, Optics Communications, 2000, Vol.182, No.4/6, pages 433 to 436	11-13, 15 1-10, 14, 16
X Y	JP 9-211508 A (Hitachi Cable, Ltd.), 15 August, 1997 (15.08.97), Fig. 6; Par. Nos. [0035] to [0036] (Family: none)	16 14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
02 June, 2005 (02.06.05)

Date of mailing of the international search report
28 June, 2005 (28.06.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003785

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Motoharu MATSUURA et al., "Raman Soliton Asshuku o Mochiita Supercontinuum-ko ni yoru Tahacho Pulse Seisei", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Gijutsu Kenkyu Hokoku, 26 September, 2003 (26.09.03), Vol.103, No.350, pages 5 to 8	1-16
P,X	Kentaro YASUNAKA et al., "Er Doped Fiber Laser no Noise-like Mode Hasshin to Bunsan Taisei", 2004 Nen The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu· Electronics 1, 08 March, 2003 (08.03.03), page 345	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2005/003785

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Whereas the inventions in claims 1-10 relate to a mode synchronizing fiber laser, the inventions in claims 11-16 relate to a noise-like pulse light source and a super continuum light generated thereby.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01S3/06, 3/098

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl.⁷ H01S3/00-3/30

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2005年
日本国実用新案登録公報	1996-2005年
日本国登録実用新案公報	1994-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	J P 4-357892 A (日本電信電話株式会社)	1-9
Y	1992. 12. 10, 全文, 全図 (ファミリーなし)	10
X	KANG J U, Broadband quasi-stationary pulses in mode-locked	11-13, 15
Y	fiber ring laser, Optics Communications, 2000, Vol. 182 No. 4/6, pp. 433-436	1-10, 14, 16

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

02.06.2005

国際調査報告の発送日

28.06.2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

古田 敦浩

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

2K

3013

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	J P 9-211508 A (日立電線株式会社)	16
Y	1997. 08. 15, 第6図, 第35-36段落 (ファミリーなし)	14
A	松浦基春他, ラマンソリトン圧縮を用いたスーパーコンティニューム光による 多波長パルス生成, 電気情報通信学会技術研究報告, 2003. 09. 26, 第103巻, 第350号, 第5-8頁	1-16
P, X	安仲健太郎他, Er ドープファイバレーザのノイズライクモード発振と分散耐 性, 2004年電子情報通信学会総合大会講演論文集・エレクトロニクス1, 2003. 03. 08, 第345頁	1-16

第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（PCT17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1-10に記載された発明が、モード同期ファイバーレーザに関する発明であるのに対し、請求の範囲11-16に記載された発明はノイズライクパルス光源とそれによるスーパーコンティニューム光発生に関する発明である。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。

☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。